

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Generator PLTMH dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan ketentuan sebesar 220 V (fasa ke netral) dengan batas perubahan 198-330 V dan nilai frekuensi 50 Hz dengan batas perubahan antara 49.5-50.5 Hz. *Governor* yang digunakan pada *plant* PLTMH digunakan sebagai kontrol frekuensi yang dapat mengatur besar bukaan *valve* untuk mengatur besar debit air yang masuk ke turbin, yaitu ketika frekuensi turun maka bukaan *valve* akan diperbesar dan sebaliknya (Widia & Hafid, 2010).

#### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro memanfaatkan tenaga aliran air sebagai sumber penghasil energi sehingga ramah lingkungan. Aliran air sungai yang dibendung memiliki debit tertentu untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator. Semakin besar nilai jatuh air maka semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan. PLTMH merupakan pembangkit yang mengubah energi potensial menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin dan generator (Dwiyanto, dkk. 2016).

PLTMH memanfaatkan debit air ( $Q$ ) dan tinggi jatuh air ( $H$ ), yang disalurkan menuju kolam penenang. Kolam penenang terhubung dengan pipa pesat dan pada bagian paling bawah di pasang turbin air. Turbin air berputar ketika mendapat tekanan air ( $P$ ), dan perputaran turbin digunakan untuk memutar generator. Setelah mendapat putaran yang konstan maka generator akan menghasilkan tegangan listrik yang disalurkan ke konsumen (Sukamta & Kusmantoro, 2013).

Daya yang dihasilkan generator dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$P = g.H.Q \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

P = daya yang dikeluarkan (kW)

H = tinggi jatuh air (m)

Q = debit air (m<sup>3</sup>/s)

g = gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

## 2.2 Keterkaitan Fluktuasi Beban Terhadap Perubahan Frekuensi

Menurut Fauzan (2009) daya yang dibangkitkan selalu sama dengan daya yang dibutuhkan konsumen (beban). Ketika daya yang dibutuhkan konsumen lebih besar dari daya yang dibangkitkan generator maka frekuensi akan turun dan bila daya yang dihasilkan generator lebih besar dari daya yang dibutuhkan konsumen maka frekuensi akan bertambah besar.

Pada sebuah generator, beban pada dasarnya merupakan beban listrik. Apabila beban tersebut diterjemahkan sebagai torsi, maka torsi tersebut dapat diterjemahkan sebagai torsi elektrik. Sedangkan daya yang keluar atau terbangkit dari generator dapat diterjemahkan sebagai torsi mekanik. Pada pengoperasian generator dalam kondisi tetap, nilai torsi mekanik akan sama dengan nilai torsi elektrik.

$$T_m = T_e \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan,

$T_m$  = Torsi mekanik yang dihasilkan generator

$T_e$  = Torsi elektrik beban

Adapun selisih daya antara sisi generator dengan sisi beban ini dapat diterjemahkan sebagai torsi percepatan.

$$T_m = T_e + T_a \dots\dots\dots (2.3)$$

$$T_a = M \times \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan,

$T_m$  = Torsi mekanik yang dihasilkan generator

$T_e$  = Torsi elektrik beban

$T_a$  = Torsi percepatan

M = Momen inersia dari generator

$\frac{d\omega}{dt}$  = perubahan kecepatan sudut putaran generator terhadap waktu

Torsi percepatan inilah yang menyebabkan percepatan atau perlambatan pada putaran rotor generator sinkron yang pada akhirnya mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh generator. Hubungan antara torsi dengan dengan kecepatan putar rotor dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = \frac{P}{\omega} \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan,

T = Torsi generator

P = Daya aktif output generator

$\omega$  = Kecepatan sudut putaran generator

Sementara itu, frekuensi yang dihasilkan oleh generator merupakan fungsi dari kecepatan sudut putaran generator yang dirumuskan dengan,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \dots \dots \dots (2.6)$$

Sehingga perubahan frekuensi terkait dengan fluktuasi atau perubahan beban dapat dituliskan sebagai berikut:

- a.  $T_m - T_e = T_a < 0$ , maka  $< 0$ , sehingga frekuensi akan turun.
- b.  $T_m - T_e = T_a > 0$ , maka  $> 0$ , sehingga frekuensi akan naik.

### 2.3 Governor

*Governor* atau sistem pengatur berfungsi untuk mengatur putaran turbin relatif tetap konstan dengan berbagai kondisi beban. Untuk melakukan fungsinya tersebut, *governor* mengukur frekuensi yang dihasilkan generator dengan cara mengukur kecepatan rotor generator tersebut karena frekuensi yang dihasilkan generator sebanding kecepatan rotor generator.

Komponen *Controller*, *Hydroelectric Servo System* dan *Hydraulic Turbine* merupakan komponen utama dari *governor*. Nilai *error speed* dan *active power* menjadi masukan ke *controller* yang menghasilkan sinyal posisi pada input *Hydroelectric Servo System*. Selanjutnya *Hydroelectric Servo System* mengendalikan *valve* untuk mengontrol laju aliran air sehingga frekuensi yang dihasilkan sistem tetap konstan (Ardha Sandy P).

a. Pemodelan Turbin Hidrolik

Turbin berfungsi sebagai penggerak dan mengubah energi potensial (daya jatuh air) menjadi daya putar. Persamaan kinerja *transien* dari turbin hidrolik berdasarkan asumsi berikut:

1. Pisau turbin hidrolik dianggap hambatan gesek yang diabaikan.
2. *Water hammer* pada *penstock* diabaikan.
3. Kecepatan air di *penstock* bervariasi sesuai dengan pembukaan gerbang.
4. Daya *output* yang dihasilkan turbin sebanding dengan kecepatan aliran air.

Persamaan (2.7) dan (2.8) merupakan laju aliran air dan *mechanical power* yang dipengaruhi sistem bukaan gerbang dan *net head*.

$$Q = G\sqrt{H} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$P_m = A_t H (\bar{Q} - \bar{Q}_{nl}) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$A_t = \frac{1}{(\bar{G}_{max} - \bar{G}_{min})} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan,

$Q$  = Turbine flow ( $m^3/s$ )

$\bar{Q}$  = Turbine flow (pu)

$G$  = Gate opening (rad)

$A_t$  = Turbine gain

$H$  = Net Head (m)

$\bar{Q}_{nl}$  = No Load flow (pu)

Persamaan (2.7) dikembangkan untuk mendapatkan perubahan aliran air di *penstock* sehingga didapat:

$$U = K_u G \sqrt{H} \dots\dots\dots(2.10)$$

Setelah kecepatan air di *penstock* ditentukan, hubungan laju aliran pada *head* dan percepatan aliran dalam *penstock* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q = AU \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{-a_g}{L} (H - H_0) \dots \dots \dots (2.12)$$

dengan,

$a_g$  = Acceleration due gravity

$L$  = Length of penstock

Normalisasi persamaan (2.10) menjadi persamaan berikut:

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}}\right) \dots \dots \dots (2.13)$$

$$T_w = \frac{LQ_{base}}{Aa_gH_{base}} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\frac{\bar{U}}{(H + \bar{H}_0)} = \frac{-1}{T_w} \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan,

$T_w$  = Water starting time (s)

$Q_{base}$  = Turbine flow ( $m^3/s$ )

$H_{base}$  = Head turbine (m)

#### b. Pemodelan Motor Servo

Motor servo digunakan untuk mengontrol katup gerbang sesuai dengan sinyal dari *controller*. Jadi motor servo disini sebagai *actuator* yang mengaktifkan dengan mendapatkan sinyal *error*. Torsi motor dapat divariasikan dengan mengubah besarnya tegangan fase kontrol demikian pula dengan arah rotasi dapat diubah dengan mengubah polaritas tegangan kontrol. Torsi persamaan (2.16) dari motor servo dapat diperluas menggunakan seri Taylor's seperti berikut:

$$T_m = t_a(0) + \frac{dt_a}{de} (e(t) - e(0)) + \dots \dots + \frac{dt_a}{d\theta} (\dot{\theta}(t) - \dot{\theta}(0)) + \dots \dots (2.16)$$

Dengan mengabaikan orde tinggi dan mempertimbangkan *zero* kondisi awal, persamaan 2.16 dapat ditulis sebagai berikut:

$$T_m = Ke(t) - f\dot{\theta}(t) \dots \dots \dots (2.17)$$

Diketahui hubungan mekanis motor,

$$T_m = J\dot{\theta} + B\dot{\theta} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dengan  $J$  dan  $B$  adalah koefisien gesekan dan momen inersia masing-masing. Dari persamaan 2.17 dan 2.18 dapat dituliskan:

$$Ke(t) - f\dot{\theta}(t) = J\dot{\theta} + B\dot{\theta} \dots \dots \dots (2.19)$$

Transformasi *Laplace* dari kedua sisi dapat dituliskan.

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{E(s)} = \frac{K}{Js^2 + (B+fs)s} = \frac{Ka}{s(t_a s + 1)} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dengan,

$K_a = \text{Gain}$

$T_a = \text{Time constan}$

## 2.4 Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan generator yang bekerja secara sinkron, yaitu yang berarti frekuensi yang dihasilkan oleh generator sinkron dengan putaran mekanisnya. Rotor generator sinkron terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah yang menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor. Hubungan antara kecepatan rotor dengan frekuensi listrik dalam stator ditunjukkan dalam persamaan

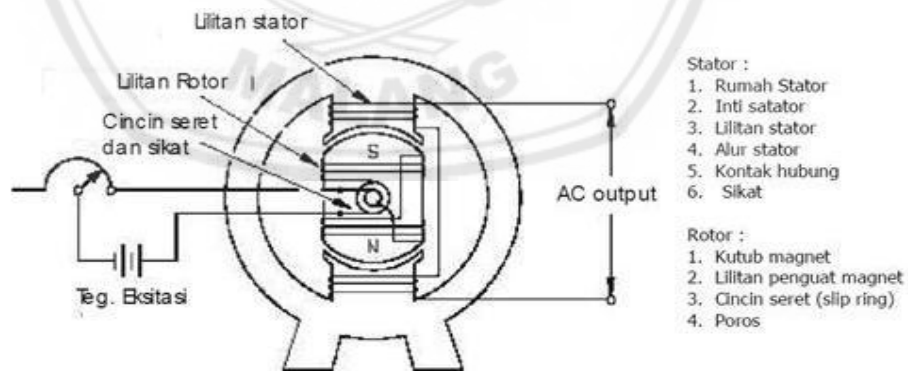
$$f = \frac{n_s \cdot P}{120} \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan:

$f$  = Frekuensi stator (Hz)

$n_s$  = Kecepatan putar medan magnet atau kecepatan putar rotor (*rpm*)

$p$  = Jumlah kutub



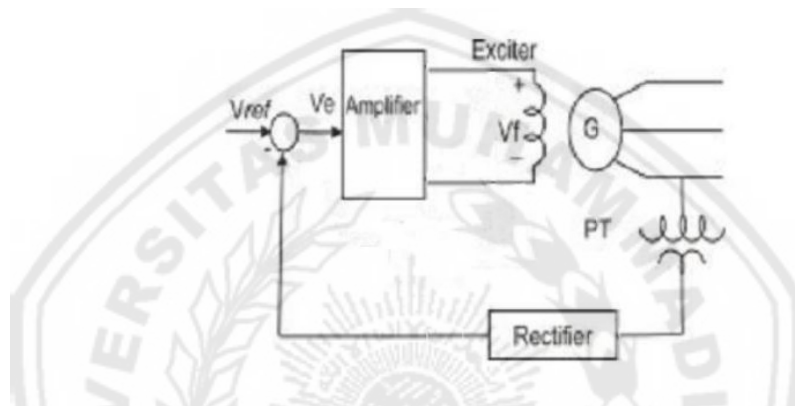
Gambar 2.1 Generator Sinkron

Gambar 2.1 merupakan generator sinkron yang menggunakan sumber tegangan DC untuk menimbulkan medan magnet yang digunakan untuk menghasilkan tegangan dalam sisi keluaran generator sinkron. Penguatan medan

magnet dari generator tidak tergantung dalam jaringan listrik sehingga membangkitkan energi listrik yang berdiri sendiri (Setyo, dkk).

## 2.5 Sistem Eksitasi

Menurut Faiz (2012) eksitasi adalah perangkat yang dipasang pada generator untuk mengatur tegangan atau amplitudo gelombang yang dihasilkan agar generator tetap stabil. Eksitasi bekerja mengatur tegangan yang dihasilkan generator dengan cara mengontrol arus penguatan dari generator.



Gambar 2.2 Model Eksitasi

### a. Amplifier

*Amplifier* sebagai penguat sistem eksitasi dapat berupa penguat magnetik, penguat putaran, atau penguat elektronik. *Amplifier* dapat direpresentasikan sebagai KA dengan konstanta waktu TA seperti persamaan berikut:

$$\frac{V_R(S)}{V_R(S)} = \frac{K_A}{1+T_s(S)} \dots\dots\dots (2.8)$$

### b. Voltage Regulator

Sistem eksitasi stabilisasi sering dicapai dalam sistem *thyristor* jaringan *lag lead* seri dari pada melalui umpan balik tingkat. Waktu konstanta  $T_B$  dan  $T_C$ ,

$$\frac{V_R(S)}{V_R(S)} = \frac{1+T_C(S)}{1+T_B(S)} \dots\dots\dots (2.9)$$

c. *Exiter*

Eksitasi yang digunakan pada generator berbeda-beda tipe seperti menggunakan generator DC atau menggunakan SCR sebagai penyearah untuk menghasilkan daya DC. Eksitasi dapat dilambangkan sebagai  $K_E$  dengan konstanta waktu  $T_E$ , yang dalam model matematisnya seperti persamaan berikut:

$$\frac{V_F(S)}{V_R(S)} = \frac{K_E}{1+T_E(S)} \dots\dots\dots (2.10)$$

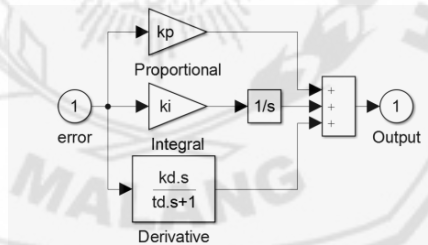
d. *Sensor*

Sensor terdiri atas gangan dan sebuah penyearah. Sensor dapat direpretasikan sebagai  $K_R$  dengan konstanta waktu  $T_R$  dan fungsi transfernya sebagai berikut:

$$\frac{V_s(S)}{V_t(S)} = \frac{K_R}{1+T_R(S)} \dots\dots\dots (2.11)$$

## 2.6 Metode PID

*Controller* merupakan suatu unit yang didesain untuk mengontrol tingkah laku secara menyeluruh dari sistem *plant*, dimana *plant* adalah unit yang dikontrol.



Gambar 2.3 Sistem Kontrol *Feedback*

$$\theta(t) = k_p(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (2.12)$$

Persamaan (2.12) dirubah ke bentuk *Laplace* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\theta(s) = k_p E(s) + k_i \frac{E(s)}{s} + k_d s E(s) \dots\dots\dots (2.13)$$

Fungsi alih *controller* PID (*Proportional Integral Derivative*):

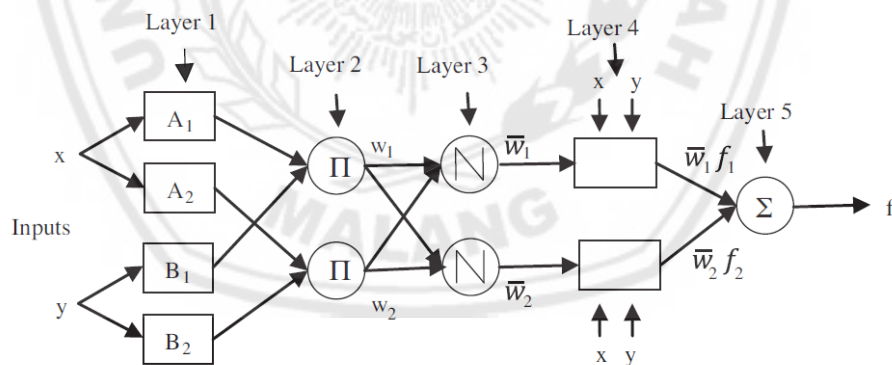
$$G_c(s) = \frac{Q(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \dots\dots\dots (2.14)$$



## 2.7 Metode ANFIS

ANFIS atau *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* adalah sistem inferensi fuzzy berbasis jaringan saraf adaptif atau jaringan adaptif. Parameter pada ANFIS adalah fungsi keanggotaan premis dan konsekuensi. Pembelajaran ANFIS mengubah parameter fungsi keanggotaan masukan dan keluaran. Pembelajaran pada ANFIS menggunakan algoritma perambatan balik atau algoritma *hybrid*. Algoritma *hybrid* adalah penggabungan algoritma perambatan balik dengan metode kuadrat terkecil (*Least Squares Estimate*). Metode *Least Squares Estimate* menentukan parameter konsekuensi, sedangkan perambatan balik digunakan untuk memperbarui bobot premis (Wahyunggoro & Charles).

Menurut Afianti, dkk (2005) struktur jaringan ANFIS terbagi menjadi lima lapis. Tiap lapisan pada jaringan ANFIS terdiri atas beberapa simpul yang dilambangkan kotak atau lingkaran seperti yang ditunjukkan gambar 2.4. Lambang kotak pada lapisan 1 dan 4 menunjukkan simpul adaptif artinya nilai parameternya dapat berubah dengan pembelajaran dan lambang lingkaran pada lapisan 2, 3 dan 5 menyatakan simpul non adaptif yang nilainya tetap.



Gambar 2.4 Arsitektur Jaringan ANFIS

Lapisan 1 berfungsi sebagai *fuzzifikasi*. Keluaran pada lapisan 1 adalah fungsi keanggotaan dari sinyal masukan. Titik pada lapis 1 bersifat adaptif dan jika diambil fungsi Gaussian maka persamaan keluarannya adalah:

$$\mu_{Ai}(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{\sigma}\right) \dots \dots \dots (2.15)$$

Lapisan 2 merupakan implikasi fuzzy dimana persamaan pada proses ini adalah:

$$O_{2,i} = \omega_1 = \mu_{A_i}(x) \mu_{A_i}(y), i=1,2,\dots \dots\dots(2.16)$$

Lapisan 3 merupakan perbandingan antara satu titik dengan jumlah titik yang ada sebelumnya dimana persamaan pada proses ini adalah:

$$O_{3,i} = \overline{\omega}_i = -\frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2} \dots\dots\dots(2.17)$$

Lapisan 4 merupakan lapis adaptif. Pada lapis ini dilakukan pembobotan atas hasil dari lapisan sebelumnya.

$$O_{4,i} = w_i f_i = w_i (p_i x + q_i y + r) \dots\dots\dots(2.18)$$

Lapisan 5 dilakukan *defuzzifikasi* nilai yang telah diproses pada lapis sebelumnya dengan persamaan sebagai berikut:

$$O_{5,i} = \sum \overline{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \dots\dots\dots(2.19)$$

